

文章编号: 1001-8166(2009)12-1339-13

南海张裂过程及其对晚中生代以来东南亚构造的启示 ——DDP 建议书 735-Full 介绍*

李春峰¹, 汪品先¹, Dieter Franke², 李家彪³, Randle Stephenson⁴, 许树坤⁵,
Peter Michael⁶, 周祖翼¹, 翦知湓¹, 李前裕¹, 刘志飞¹, 耿建华¹, 木村学⁷,
阎 贫⁸, 丘学林⁸, 王嘹亮⁹, 解习农¹⁰, 吴时国¹¹, 吴能友¹²

(1 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092 2 Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover D-30655, Germany, 3 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012
4 University of Aberdeen, Aberdeen AB243FX, Scotland 5 台湾中央大学, 台湾 桃园 32001
6 University of Tulsa, Tulsa 74104, USA; 7 The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan
8 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301 9 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075
10 中国地质大学, 湖北 武汉 430074 11 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071
12 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘 要:南海的形成揭示了大陆边缘张裂和盆地形成的复杂模式, 尽管已经进行了广泛研究, 但是关于基底岩石和深海盆沉积层的精确年代数据还很缺乏, 这使得对南海张裂年代的估计存在很大的误差, 对张裂机制和历史的各种假设没有得到验证。同时只有对南海的张裂过程有了精确地分析与刻画, 才能更好地理解西太平洋边缘海盆地的形成以及它们在印支块体受印度—欧亚板块碰撞而向东南挤出、青藏高原隆升中可能起到的作用。2009 年正式提交的国际综合大洋钻探计划 (DDP) 建议书 735-Full 建议在南海深海盆内的 4 个站位上实施钻探。这 4 个站位分布在南海盆地 4 个不同的次级构造单元上 (南海东北部、西北次海盆、东部次海盆和西南次海盆), 这样的站位设计会确保完成本建议书的整体研究目标, 即揭示南海的张裂历史和它对晚中生代以来东南亚构造的启示。位于南海盆地最东北部的站位有助于确定该区域地壳的属性和验证古南海是否存在, 位于西北次海盆的站位可能会提供南海的最早张裂年代, 另外 2 个分别位于东部次海盆和西南次海盆的站位将重点确定 2 个次海盆的绝对年龄、基底矿物成分与磁化率以及 2 个次海盆的相对张裂次序。这些站位的水深大约在 2 910~4 400 m, 钻探深度预计到海底以下大约 700~2 200 m, 总的钻透深度为 5 959 m, 其中 5 359 m 穿透沉积层, 另外 600 m 或 400 m 钻入基底。所有这些站位的位置是由已有的地球物理观测数据所确定, 目前计划收集更多的地质与地球物理数据以满足 DDP 对井位调查数据的要求。

关键词:南海; 大陆破裂; 盆地形成; 海底扩张; 地壳演化和地幔流

中图分类号: P736.22⁺; P756.5 **文献标志码:** A

* 收稿日期: 2009-11-04 修回日期: 2009-11-27

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“日本南海海槽俯冲增生楔前缘的构造变形分析—兼与马尼拉俯冲带的对比”(编号: 40876022); 国家重点基础研究发展规划项目子课题“南海新生代大陆边缘的构造演化模式”(编号: 2007CB411702); 国家高技术研究发展计划重点项目“大洋钻探站位调查关键技术研究”(编号: 2008AA093001)资助。

作者简介: 李春峰 (1970-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 主要从事海洋地质与地球物理研究。E-mail: cfl@tongji.edu.cn

1 建议书科学问题的背景

晚中生代以来东亚地质经历了 2 次构造变革, 一个是晚中生代古太平洋板块的俯冲, 另一个是新生代青藏高原的隆升和西太平洋边缘海的形成。作为西太平洋边缘海的典型代表之一, 南海在新生代(约 32~ 16M a BP) 经历了从大陆边缘裂解到最终的海底扩张的演化过程。南海正好位于欧亚板块、西太平洋板块和印度—澳大利亚板块的交汇处(图 1), 除了这个独一无二的地质环境, 其他的一些属性使其成为研究大陆裂解和盆地形成的理想的天然实验室, 而大陆裂解和盆地形成也是 IODP 的优先重点研究领域。南海相对较小的规模也有利于在两侧共轭大陆边缘之间进行构造比较, 而且这样的研究通过一个 IODP 航次就可完成。同时, 南海尽管演化历史很短, 却几乎经历了一个完整的从大陆解

体到海底扩张再到俯冲消减的 Wilson 循环, 因而这里也很适合研究各种类型的板块边缘活动, 如大陆边缘裂解^[1]、洋壳俯冲(马尼拉海沟^[2])、走滑断裂(红河断裂^[3])以及活动造山过程(台湾^[4]) (图 1)。对晚中生代张裂前构造背景和新生代张裂和扩张阶段的更好理解是提高对东亚构造和大陆边缘盆地形成地球动力学一般问题认识的关键^[5]。

1.1 南海张裂前的晚中生代和早第三纪构造

一般认为在亚洲东南部大陆边缘曾经存在一个晚中生代 Andes 型古太平洋俯冲带^[6-14], 然而在南海大陆边缘, 对从中生代主动型大陆边缘转换到新生代被动型大陆边缘的晚中生代地球动力学过程与机理还很不清楚。另外, 有人认为本区晚中生代海相地层与可能在侏罗纪曾到达这里的中特提斯有关^[15-17], 南海东北部区域曾经位于中特提斯和古太平洋之间的转换带上^[17-23]。本区古生物研究表明

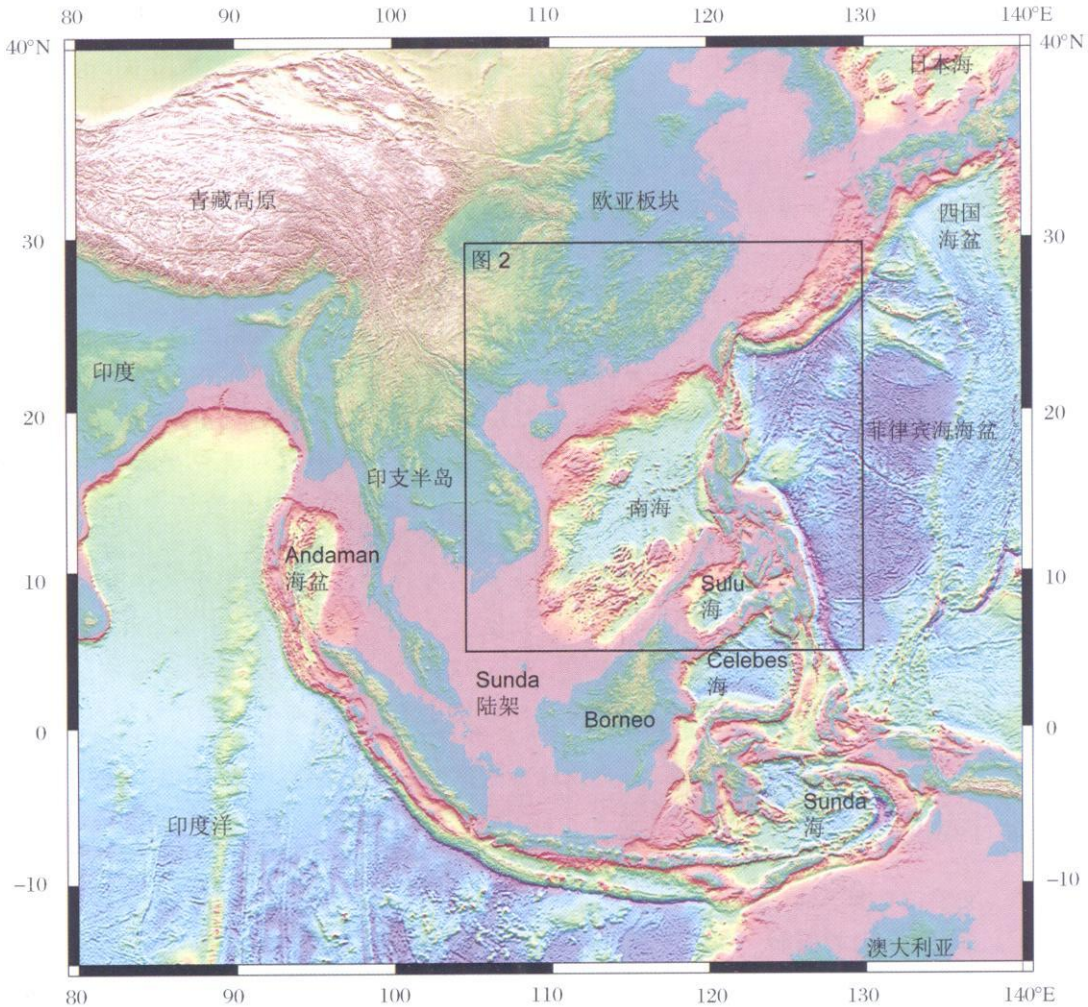


图 1 东南亚区域地形和地球动力学框架

Fig 1 Regional topography and geodynamic framework of Southeast Asia

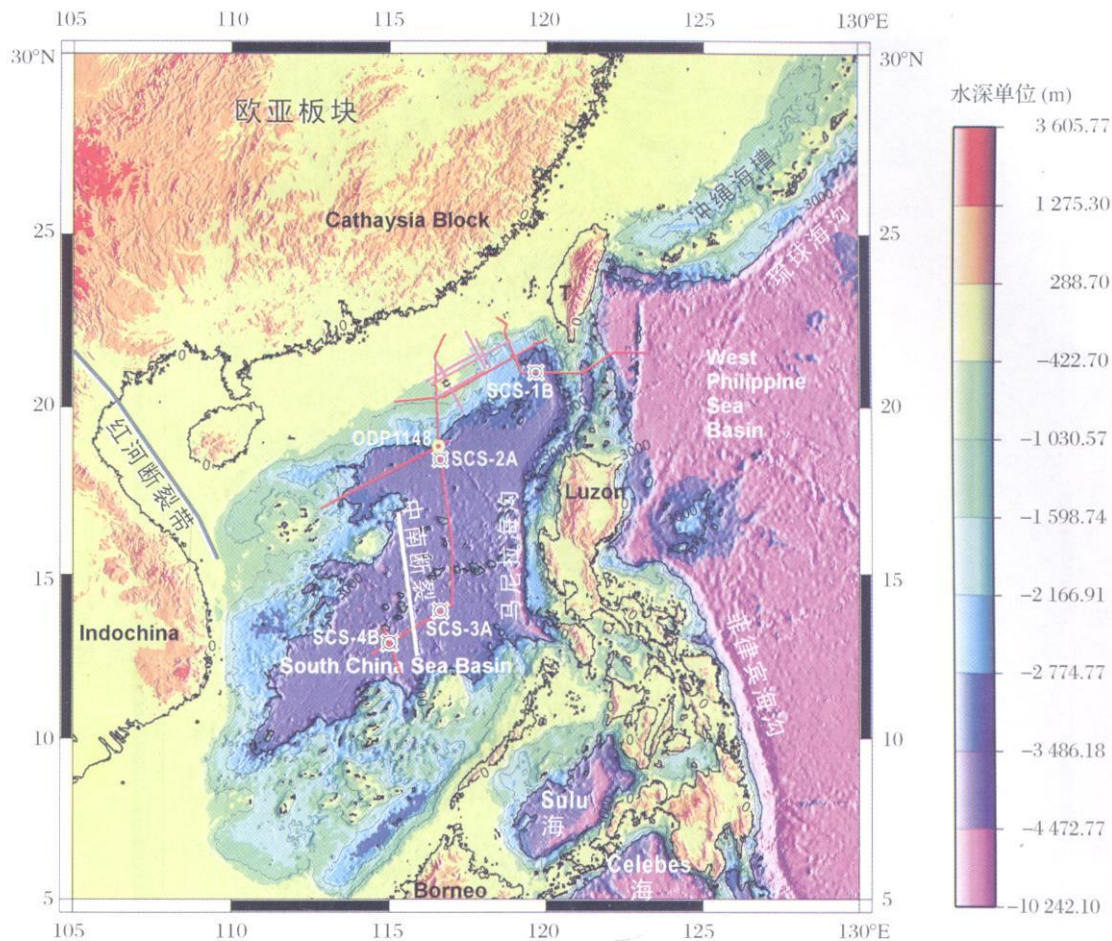


图 2 南海及邻区地形和水深图

Fig 2 Topographical and bathymetrical map of the SCS and its adjacent region

3 个等深线分别代表 1 000 m, 2 000 m, 和 3 000 m 水深, T-台湾, 红色和粉红色线段是部分地震测线的位置,

SCS-1B, SCS-2A, SCS-3A, 和 SCS-4B 是本建议书的 4 个建议钻探站位

Three isobaths shown on the map are 1 000 m, 2 000 m, and 3 000 m, respectively. T = Taiwan

Red and pink lines are some of the existing seismic sections SCS-1B, SCS-2A, SCS-3A,

and SCS-4B are locations of four proposed drilling sites

一些晚中生代大化石显示出与特提斯生物群很近的相似性, 而另外一些显示出更典型的太平洋生物群的特征^[19, 20, 24~26]。这些研究表明本区晚中生代演化的复杂性, 需要更多的约束条件来认清中特提斯和古太平洋之间相互作用的方式。

南海海盆最东北部是解决上述晚中生代问题的关键(图 2), 将会填补在晚中生代的俯冲和新生代大陆边缘的裂解及洋壳形成过程之间认识上的空白。10 Ma 以前南海北部被动大陆边缘可能曾经到达了台湾东北部区域^[27~29], 而 Sibuet 等^[30~32] 则认为 15 Ma 以前琉球俯冲带向南伸展到了南海最东北部区域, 并认为南海东北部海盆的一部分由比现在的南海洋壳古老的洋壳构成。关于在大约 44 Ma 前

关闭的古南海洋盆(又称为 Rajang 海^[33] 或 Danau 海^[34]) 有各种假说^[28, 35], 它的存在可由当今南海南部及外围广泛分布的侏罗纪、白垩纪和早第三纪海相沉积证实, 这个古南海的大部分可能已经向南俯冲到发育在婆罗洲和巴拉望一带的岛弧之下, 或者隆升成为这些岛弧的一部分^[36, 37]。Li 等^[38~40] 记录了南海最东北部的复杂性以及南海最东北部与南海中部的巨大差别, 同时提出南海最东北部究竟是存在古南海洋壳, 还是被一个强烈拉伸变薄的含中生代地层的陆块或者仅仅是一个典型的洋陆转换带所覆盖等问题。这些不同见解的解决会从根本上形成对南海早期张裂历史的认识, 而这只能通过在该区进行科学钻探来完成。

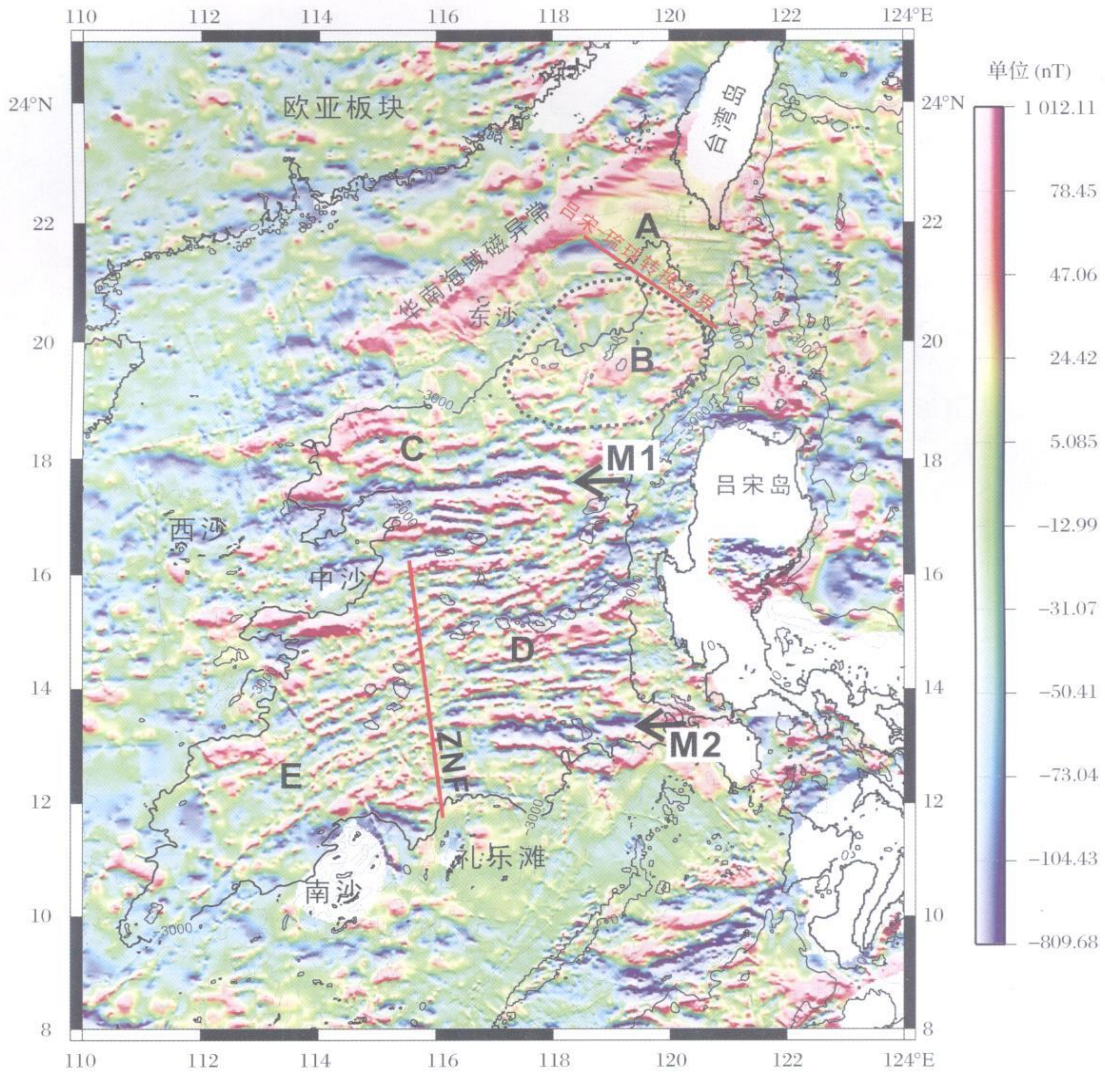


图 3 南海区域总磁异常图^[39], 图中显示了 5 个主要的磁异常区 (A, B, C, D, E)

Fig 3 Total field magnetic map showing five major magnetic zones (A, B, C, D, and E)

M1 和 M2 是区 D (东部次海盆) 南北两侧的两个重要负磁异常。ZNF = 中南断裂。虚线圆圈表示的是区 B 的范围。

区 A, C, D 和 E 分别与南海最东北部、西北次海盆、东部次海盆、西南次海盆对应

M1 and M2 are two major magnetic anomaly belts bounding the zone D (East sub-basin). ZNF = Zhongnan Fault. The dashed circle outlines the zone B. Zones A, C, D, and E correspond with the northeasternmost SCS, the northwest sub-basin, the east sub-basin, and the southwest sub-basin, respectively^[39]

1.2 南海新生代张裂机制和阶段

新生代南海的张裂机制仍是个悬疑, 没有统一的认识。目前的假说包括:

- (1) 印度—欧亚板块碰撞造成主要沿着红河断裂带的构造挤出过程^[41~44]。
- (2) 与古太平洋沿着西太平洋边缘俯冲相关的扩张^[45], 或者与向沙巴/婆罗洲下俯冲有关的扩张^[9]。
- (3) 与地幔柱上涌有关的扩张^[46]。

磁场和地震数据显示南海海盆可以被细分成 5 个磁异常区^[39] (图 3), 每个区都有自己的磁场特征模式, 区域 A 大致呈三角形, 被华南沿海磁异常、台湾造山带、吕宋岛弧、吕宋—琉球转换板块边界 (LRTPB) 围限^[31, 38, 39, 47] (图 3), 在区 A 内东西走向、短波长磁异常很清晰^[31, 47]。磁异常区 B 与区 A 之间的边界为吕宋—琉球转换板块边界 (图 3), 其两侧磁场和地震反射特征有明显的不同, 区 B 近似圆

形,没有明显的磁条带,在经过区 B 的地震剖面上可以看到分布广泛的火山岩体^[31, 38, 39, 48, 49]。区 C 位于区 B 的西南侧,属于西北次海盆里,区 C 的南部边界有一明显的负磁异常(图 3 中的 M1),区 C 具有明显的东西向的磁条带,但是磁异常的强度没有区 D 的强且磁异常的波长较长。磁异常区 D 与南海东部次海盆对应,北部以 M1 为界限,南部以一个与 M1 类似的清晰的负异常为界(图 3 中的 M2),M1 和 M2 相对残留的扩张中心近乎对称分布,残留扩张中心处的海山链是在 16 Ma 年前的南海扩张停止后晚期的火山作用形成的^[43, 45, 50~52]。区 D 内的磁异常强度很大,呈近东西向展布。与西南次海盆对应的磁异常区 E 内的磁异常特征在强度和方位等方面都明显不同于区 D,两区被处于西南次海盆和东部次海盆之间的中南断裂所分割^[38, 39, 53, 54](图 2, 3)。西南次海盆和东部次海盆之间这种显著的

磁异常差异支持南海的多期次扩张模式^[38, 55],或者这种差异是由两个次海盆独立演化而形成不同的地壳类型所致。Pautot 等^[50]认为东部次海盆形成一个更老的早期存在的洋壳内部,而西南次海盆则由大陆张裂和最终的洋壳扩张而形成。

所有关于南海张裂的地球动力学模型必须能够解释前面所观测到的不同次海盆内磁异常特征的差异。虽然目前已经有一些新生代构造演化模式,但是仍然不能确定南海海盆究竟是经历了一次还是多期次的扩张,如果是多期次扩张,也不了解不同次海盆之间的扩张次序^[1, 38, 39, 43, 45, 50, 55, 56](表 1)。

上述一些中—新生代的科学问题好像都只是南海的具体问题,但是对这些基本问题的回答需要获得关于大陆边缘张裂与盆地形成的机理、边缘海深部岩石圈动力学过程以及东南亚区域构造背景等方面的知识,并由此加深我们对这些问题的理解。

表 1 关于磁异常条带以及热流和水深所确定的南海海盆扩张形成时间的一些不同观点

Table 1 Different views on the opening ages of the South China Sea

研究者	年代 (Ma)	研究区域范围	发表时间	研究数据
Taylor 等 ^[10, 45]	32~17	东部次海盆	1980, 1983	磁异常
Briais 等 ^[43]	32~16	中央海盆	1993	磁异常
姚伯初等 ^[56]	42~35	西南次海盆	1994	磁异常
Barckhausen 等 ^[57]	31~20.5	中央海盆	2004	磁异常
Hsu 等 ^[58]	37~15	中央海盆与南海东北部	2004	磁异常
Ru 等 ^[55]	约 55	西南次海盆	1986	热流和水深
	35~36	西北次海盆		
	~32	东部次海盆		

2 南海深海盆钻探的科学目标

2.1 具体科学目标

建议 4 个钻到南海海底的站位(表 2)来精确测定火成岩基底或中生代沉积岩以及上覆新生代沉积岩的年代、测量基底岩石的物理属性(如磁化率与磁感应强度)、分析海盆内不同位置的裂后沉积环境。这些研究对获得清晰完整的南海张裂历史是必不可少的,并且能实现下面具体的科学目标:

(1) 更好地理解西太平洋边缘海的新生代演化、东亚大陆板块新生代的演化和该区晚中生代特提斯和古太平洋的相互作用。

(2) 通过一个 IODP 航次,验证控制从大陆裂谷到张裂再到海底扩张的转变的动力学过程,以及边缘海区域扩张和地壳形成过程等各方面的假说。

(3) 分析并约束南海张裂的驱动力是来自远场

(由印支块体的构造挤出触发)、近场(弧后扩张引起)还是原地(岩浆作用驱动)。

(4) 通过科学钻探、采样、定年来建立不同次海盆(即西北次海盆、西南次海盆、东部次海盆)的复杂张裂历史。

(5) 揭示南海盆地最东北面的地壳性质、年代和归属以便进行更好的地球动力学重构。

(6) 测量基底岩石(洋壳物质)的磁化强度、矿物学和地球化学成分来帮助约束 3 个次海盆里明显的磁性差异的构造控因(如扩张速率)。

(7) 整合这些研究结果,加深对导致当今和地质历史里弧后沉积盆地形成的地幔和岩石圈地球动力学过程相互作用的整体认识。

2.2 建议站位说明

表 2 总结了 4 个建议井位的信息,根据晚中生代沉积岩可能会在新生代基底 Tg 之下钻遇的假设,

表 2 建议钻探的站位的名称、位置、水深与钻探深度、具体研究目标

Table 2 Names, locations, water depths, penetration depths and objectives of the four proposed drilling sites

站点名	位置	水深 (m)	钻探深度 (m)			具体目标简介
			沉积层	基底	总厚度	
SCS-1B	21° 0' 06.24" N 119° 24' 37.92" E	2 910	1 884	300, or 100*	2 184	南海最东北部的地壳性质、年代和归属
SCS-2A	18° 22' 17.66" N 116° 38' 31.12" E	3 875	1 995	100	2 095	南海海底扩张最早年龄, 年代对比
SCS-3A	13° 56' 81.76" N 116° 46' 14.18" E	4 206	596	100	696	张裂次序和东部次海盆的历史; 基底矿物组成和磁化
SCS-4B	12° 55' 13.7" N 115° 2' 83.26" E	4 383	884	100	984	张裂次序和西南次海盆的历史; 基底矿物和磁化

* 如果钻遇中生代沉积地层则钻深 300 m, 如果钻遇大洋玄武岩则钻深 100 m

建议在站点 SCS-1B 钻透 300 m 深度的基底, 较深的钻透深度能更好的确定这些岩石的岩性、地球化学性质和起源, 但是如果钻遇大洋玄武岩, 则将基底钻深深度改为 100 m。另外 3 个站点处建议 100 m 的基底钻深, 采用非立管钻探 4 个站位的钻井和测井的总时间大约 50 天, 站点间总航时约 2-3 天。

• 建议站点 1: SCS-1B

SCS-1B 位于磁异常区 A (南海最东北部), 目标是验证南海洋盆最东北部 (处于吕宋—琉球转换边界以东) 是古南海洋壳 (其可能归属于古太平洋洋壳^[59]), 或由强烈拉张消减的具有中生代基底陆壳的构成, 还是仅仅是个典型的洋—陆过渡带。如果存在古太平洋洋壳, 南海洋盆最东北部是最有可能保存古太平洋洋壳的地方^[31-38, 40, 59], 过此站位的地震剖面显示 (图 4) 3 套沉积, 但是由于没有钻井, 岩石年龄还未知, 通过区域地层对比估计上面的 2 套是渐新统或更年轻的地层^[38]。T_g 不整合面下的反射表现出较好的横向连续性并且形成褶皱, 说明曾经历挤压过程, 这些特征说明此处浅埋的基底可能主要由与台南盆地西北部发现的中生界相类似的中生代沉积岩^[39, 40], 而不是由典型洋壳的基性火成岩构成。如果这样, 这些中生代沉积岩是古南海的产物, 还是大陆分裂后的残留? 关于中特提斯还是古太平洋起主要作用的问题可以由可能钻遇的中生代岩石的古生物和地球化学分析所确定, 研究结果将对本区的区域构造重建起至关重要作用, 而这些都需要钻遇岩石的精确年龄和岩性来确定, 另外 SCS-1B 站位离马尼拉俯冲带和台湾地震带较近, 可以随后在井孔放置地震检波器来长期监控该区的地震、火山和海啸灾害。

• 建议站点 2: SCS-2A

南海开始张裂的时间问题可能要在西北次海盆

找到答案, 该区显示出最深的基底 (图 5), 从磁异常资料上看可能是南海最老的次海盆^[10, 43, 45, 50]。此钻探站点的目标是验证南海在约 32 Ma 前在西北次海盆处首先张裂 (图 5), 此站位在 ODP1148 站位以南约 60 km, ODP1148 站位于洋—陆转换带上并且已揭露详细的新生代岩性特征^[60, 61], 然而沿着南海北部边缘几乎普遍存在火成岩体 (如图 5 共深度点 8 000 处), 将洋—陆转换带的新生代地层与南海深海盆地内的地层分开, 因此很难从 ODP1148 点的新生界地层去对比深海盆的地层^[39], 缺少对南海海盆内新生代地层的详细对比也是对南海新生代张裂历史存在争议的一个原因。

在南海盆地北部边缘附近打钻, 可能会确定最早的张裂年代和洋壳上覆盖的最老沉积岩石的年龄, 因为 SCS-2A 处于南海沉积岩厚度最厚处之一, 它可能会提供最高分辨率的化石和地球化学记录, 由于该点在 Taylor 等^[45]确定的最老的磁异常条带 11 附近, 此处的基底岩石将会提供磁异常估计的年代与从化石记录、放射性定年、磁性地层学等方法确定的年代之间的校准。

• 建议站点 3: SCS-3A

无论在强度上还是在结构走向上, 西南次海盆 (磁异常区 E) 的磁场特征与区域 D 的明显不同, 两者明显以中南断裂为界^[38, 53, 54] (图 3), 由于东部和西南次海盆之间的明显差异, 有理由探寻这 2 个次海盆的张裂和扩张是否同时发生以及与西北次海盆相比它们是以何种次序和方式演化的。

SCS-3A 位于东部次海盆磁异常条带 6a 附近^[43, 45] (图 5), 在此处打钻将会帮助确定东部次海盆的年龄, 并且可对根据磁异常得到的年龄与根据化石、磁性地层学、放射性方法得到的年龄进行对比验证。基底岩石的矿物与化学成分和磁化率测量结

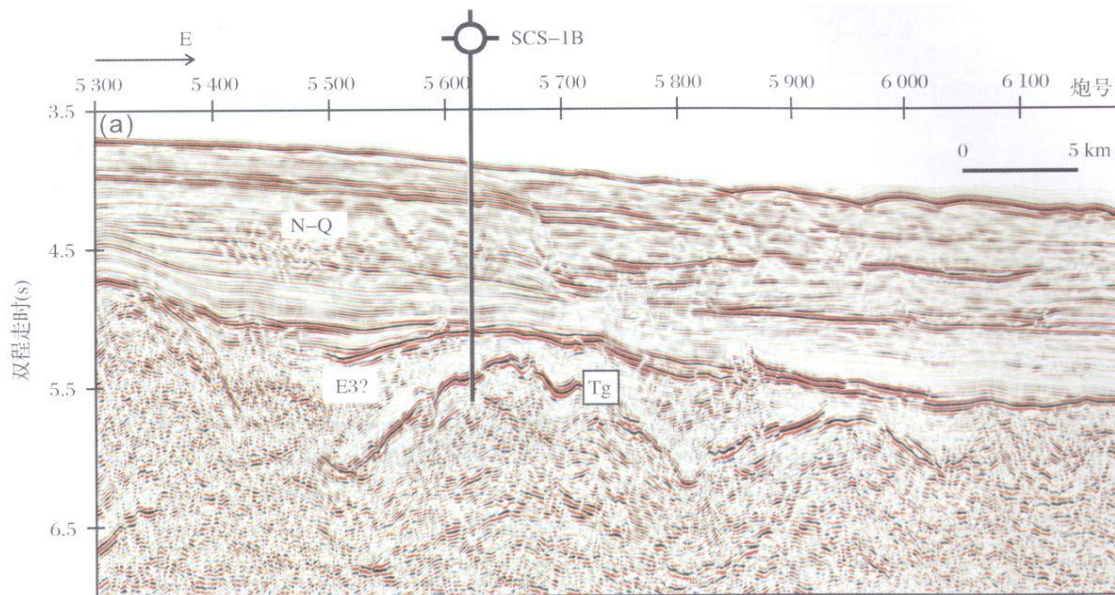


图 4 南海最东北部通过 SCS-1B 的地震反射剖面^[38]

Fig. 4 Seismic reflections in the northeasternmost South China Sea^[38], TWTT = two way travel time, SP = shot point
Tg 是解释的新生代基底, 剖面位置见图 1

Tg is the interpreted Cenozoic basement, See Fig. 1 for location

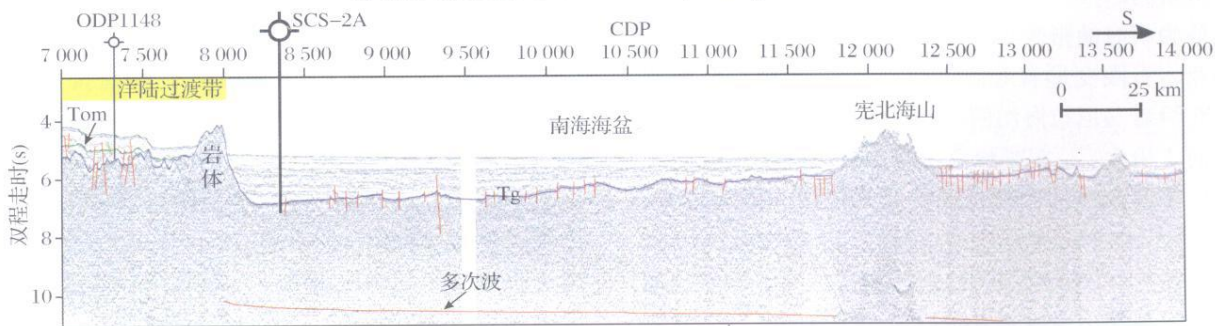


图 5 过 SCS-2A 站点的地震剖面^[39]

Fig. 5 Seismic section showing the continent-ocean transition zone (COT), and the deep see basin^[39]

图中显示出南海北部大陆边缘的洋陆转换带 (COT) 和深海盆地; Tg 是新生界基底, 层位 Tom 代表渐新统和中新统间的不整合; 剖面位置见图 1

Tg is the Cenozoic basement, Horizon Tom represents the unconformity between the Oligocene and the Miocene, See Fig. 1 for location

果可以解释东部次海盆与西南次海盆之间磁异常强度和走向上的巨大差别。另外, 此站点还可以检验东部次海盆是在早期洋壳区域内形成的新洋壳的假说^[50]。

• 建议站点 4: SCS-4B

该站点位于西南次海盆 (图 6), 邻近磁异常条带 6a^[43], 与站点 SCS-3A 的研究和钻探目标相似, 在此处的科学钻探将会帮助确定西南次海盆的年龄, 并且可对根据磁异常得到的年龄与根据化石、磁性地层学、和放射性方法得到的年龄进行对比验证。与

站点 SCS-3A 相结合可以解释东部次海盆与西南次海盆之间磁异常强度和走向上的巨大差别, 并且可以检验西南次海盆是起源于大陆张裂的假说^[50], 并与东部次海盆在形成机制上存在巨大差别。与其它站点一样, 这里的观测结果将会深化对南海张裂历史的认识。

3 南海深海盆科学钻探的重要意义

3.1 南海海盆进行钻探的区域与全球意义

在南海采集基底岩石样品的直接好处是可以直

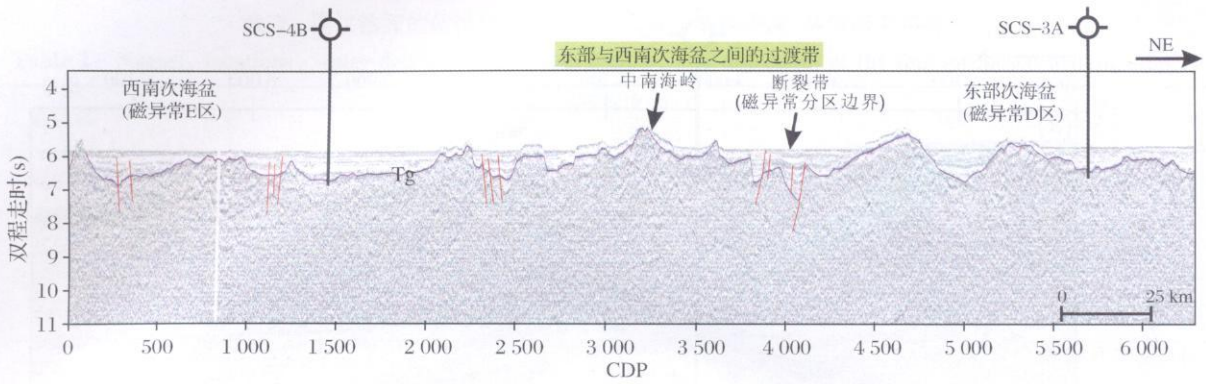


图 6 过 SCS-3A 和 SCS-4B 站位的地震测线显示西南次海盆与东部次海盆的构造及其之间的转换带

Fig 6 Seismic section showing the structures of the southwest sub-basin and the east sub-basin, as well as the transition zone in between

T_g 是新生界基底, 剖面位置见图 1^[39]

T_g is the Cenozoic basement. See Fig. 1 for location^[39]

接测定基底岩石的成分并确定其年代, 进而更精确地重构南海的张裂过程和新生代东亚区域演化。如上所述南海位于欧亚板块、西太平洋板块 (菲律宾海板块) 及印度—澳大利亚板块的汇合处 (图 1), 有人认为南海的张裂与青藏高原的隆升以及伴随的东南亚岩石圈变形有起源上的联系^[41-43, 62, 63], 南海海盆在沿着马尼拉海沟俯冲之前的初始海盆可能是现在的 2 倍大^[31], 很难想象仅印支板块的挤出就能触发位于其东边的大型边缘盆地的张裂。确实, Rangin 等^[64]和 Morley^[65]认为只有一小部分与南海张裂有关的伸展被转换到红河断裂带。为了更好地检验西太平洋边缘盆地是否以及如何与由印度—欧亚板块碰撞引发的向东的地幔流有关^[44], 需要研究这些边缘盆地的基底岩石并寻找被欧亚地幔流侵染的有力的证据, 而这只能通过大洋钻探来实现。

太平洋西部有一系列边缘海盆地且它们的形成多少也与西太平洋板块的俯冲有关, 然而这些盆地的张裂机制和类型有很明显的差别, 虽然有些可以被简单的归结为弧后扩张 (如四国海盆), 而南海却不是典型的弧后盆地, 至少就其目前的形态来看不是。为了更好地理解这些盆地的相似性以及更重要的差异性, 需要对南海进行深入研究。在早期的深海钻探研究中, 在一些西太平洋边缘盆地 (如 Sulu 海、Celebes 海、日本海、菲律宾海等) 已经有一些深海钻井 (如 DSDP 6 和 31 航次; ODP 124, 127, 128 航次), 并且获得了一些关于年代和地壳演化的重要发现。作为大陆边缘张裂和盆地形成的一个典型代表, 南海当前急需一个专门的关于构造的深海钻

探航次, 基于南海独一无二的构造特征, 期望在这个盆地里的钻探项目会带来许多创造性和影响深远的科学结果。

南海当前的形态与其东侧菲律宾海板块的旋转北移以及南面正在进行的印度—澳大利亚板块对 Sunda 陆架、Sunda 和 Java 岛弧的俯冲碰撞密切相关^[66, 67], 然而, 对沿着 Sunda 海沟的俯冲过程与南海海盆之间在构造和深部地幔上可能存在的相互作用的了解最少, 南海海盆的扩张脊与 Sunda 海槽近于垂直, 因而南海不大可能是 Sunda 弧后的弧后盆地。俯冲的印度洋板块可能对南海深部地幔作用有影响, 但是这也需要通过深海钻探和取芯来研究, 本建议书的建议井位 (SCS-2A、SCS-3A、SCS-4B) 上都有基底岩石取样的计划, 并且这些站位都选在对研究区域地幔过程和地幔流最有利位置。

除了可能的的外力作用, 原地的地幔上涌是南海张裂的第 3 种解释, 南海可能是一个大西洋型边缘海^[45, 46], 是沿着已经存在的薄弱带形成大陆边缘破裂并最终形成洋壳, 对南海地区活动张裂过程的理解将会帮助认识全球其它具类似构造环境的区域, 如加利福尼亚湾、日本海和安达曼海。大陆岩石圈上已经存在的薄弱带常常是张裂的哺育区^[68-73], 因此研究张裂和大陆解体前的区域地质背景是至关重要的, 特别设计站位 SCS-1B 来采集中生代的基底沉积岩来实现这些这些目标, 它将会帮助 ① 检验古南海的存在性; ② 揭示古太平洋的俯冲和中特提斯东南端延伸部分之间的复杂历史; ③ 理解中生代构造在新生代张裂和边缘海形成中的作用和影响。

总之,南海是东亚的中心,可以提供对亚洲东南部复杂地质历史以及其它张裂系统的地球动力学过程的重要信息。

3.2 在西太平洋边缘海盆地采样洋壳岩石的科学意义

南海目前的地球动力学重构缺乏详细的年代约束,因此岩芯定年将是一环,但是对边缘海盆地基底洋壳岩石采样的意义远不止于此。南海不同区域磁异常之间的明显反差是最令人感兴趣的^[39],需要搞清其起因。一个显然的获得对不同区域磁异常差异的深入认识的方法就是如本建议书提出的在不同区域进行基底岩石采样。需要仔细分析究竟是岩石的磁化率和成分不同还是有其它方面的原因(如年龄、变质作用、热流、扩张速率、冷却速率、岩浆供给、岩浆同化过程、重加热、磁性取向、磁化层的厚度等)引起了东部和西南次海盆之间磁异常的明显差异。更好地了解海底磁异常和磁化过程的努力可以追溯到早期深海钻探阶段,并一直到现在仍是一个研究的主题。DDP 初始科学计划在提到 21 世纪的莫霍孔时指出“……当有完整的下部洋壳剖面可供分析后,才能更好地理解海洋磁异常的来源……”。在被提议的巨大“莫霍钻”项目实施之前,基底钻探和基底岩石分析将会积累很多迫切需要的经验和技巧。

除了定年,地球化学分析也是追踪深部地幔过程和地被邻近块体地壳同化或地幔侵染的有效手段。如最近对 ODP127/128 航次获得的日本海玄武岩 Nd-Sr 同位素成分分析揭示出向东的软流圈流动和亏损的地幔^[74],到目前为止关于边缘海张裂盆地岩石圈的冷却过程还知之甚少,有研究认为南海上地幔存在一个高速带^[75],可能是由南海冷却过程中岩浆分异作用导致,基底表层附近的玄武岩岩可能含有岩浆过程和地幔流行为的信息。

基底钻探也是直接确定化学通量、热流、深部生物圈、海底下水热活动的唯一手段,深海钻探已经对认识极端生物圈、海底下水热活动方面作出了巨大贡献,本建议书站位的基底钻探较深,因此也是这方面研究的理想位置。

已经有一些 DSDP/ODP/IODP 站位(如 332、395、418、504、735、801、1256 和 U1309)的基底钻透厚度接近或超过 500 m,其中最厚的一个达到 1 800 m。然而,它们没有一个是位于西太平洋边缘盆地。在早期的 DSDP/ODP/DDP 航次中(DSDP 航次 6 和 31、ODP 航次 124、127 和 128),在 Su-

lu 海、Celebes 海、日本海和菲律宾海得到了一些基底浅层的岩芯,对揭示这些区域复杂的构造历史很有帮助^[76-79],但是西太平洋边缘海有各种不同的起源和演化史^[77],只有通过一个完整的南海钻探航次才会很大程度上丰富对西太平洋边缘海起源和演化史的完整认识。在最近的一个 IODP 主题评估报告里^[80],提到“……在 ODP 最后阶段和 DDP 初始阶段对洋壳形成和结构的研究……证明这项研究仍然是一个可以获得前沿和令人惊讶的一级重要性科学结果的领域”,南海在磁异常、几何形状、地层、水深特征的复杂性使得它成为一个理解大陆边缘地球动力学和洋陆相互作用的理想天然实验室^[81]。

3.3 对未来油气勘探的意义

除了上述科学问题外,在南海深海盆实施科学钻探也具有非常重要的实际意义,因为近年来油气勘探的领域越来越多的涉及到深水沉积盆地和深部中生界的油气潜力,而目前在南海深海盆尚没有一口钻井的局面极大地限制了对深部新生代沉积地层的刻画。本建议书提出在南海东北部钻探可能的中生界基底以及在南海深海盆钻穿新生代沉积层的钻探目标,显然一旦能够成功实施,将会对区域油气评价提供重要的指导作用。

4 IODP735-Full 建议书的提交与评估历史

本科学建议的初始酝酿阶段是在 2008 年上半年,得到了各位建议人和其他一些科学家的热情支持和鼓励,初始建议书于 2008 年 10 月 1 日提交到 DDP,尔于 2008 年 11 月 8 日在美国旧金山得到 DDP 科学指导与评估工作组(SSEP)的审核,SSEP 对建议书的内容给予比较积极的评价,并建议提交正式建议书。2009 年 2 月 6 日,IODP 的井位调查工作组(SSP)在韩国釜山对建议书的井位调查资料的充分性进行了评估,但是由于当时还没有在网上向 DDP 数据库提交任何井位调查资料,SSP 认识到我们有很多支撑数据并建议提交数据,但是没有对井位调查资料的充分性给出评价。2009 年 10 月 1 日,依据 SSEP 和 SSP 的意见对初始建议书做了修改补充并向 DDP 提交了正式建议书。很快就会得到 DDP 各个工作组的评价。一个好的建议书除了有重要的科学思想和全球意义之外,还必须有充分的井位调查资料来保证具体井位的评价和可钻探性,同时 IODP 对井位调查资料的要求也越来越苛刻,因此,下一步面临的重要工作就是针对建议站位

的地球物理调查工作和资料收集工作, 显然这需要建议书各建议人以及相关单位的继续合作和各个经费资助机构的大力支持。

致谢: 非常感谢张少武在成文过程中提供的大力帮助, 同时也对拓守廷博士的帮助表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Hayes D E, Nissen S S. The South China Sea margins: Implications for rifting contrasts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 601-616.
- [2] Li Chunfeng, Zhou Zuyi, Li Jiabiao, et al. Precollisional tectonics and terrain amalgamation offshore southern Taiwan: Characterizations from reflection seismic and potential field data [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 50: 897-908.
- [3] Clift P, Sun Z. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong Basin and the southern Hainan margin, South China Sea: implications for Tibetan uplift and monsoon intensification [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JB004048.
- [4] Huang C Y, Xia K Y, Yuan P B, et al. Structural evolution from Paleogene extension to Latest Miocene Recent arc-continent collision offshore Taiwan: Comparison with on land geology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19: 619-639.
- [5] Yamasaki T, Stephenson R. Change in tectonic force inferred from basin subsidence: Implications for the dynamical aspects of back-arc rifting in the western Mediterranean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277: 174-183.
- [6] Jahn B M, Chen P Y, Yen T P. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance [J]. *Bulletin of Geological Society of America*, 1976, 86: 763-776.
- [7] Hilde T W C, Uyeda S, Koenke L. Evolution of the Western Pacific and its margin [J]. *Tectonophysics*, 1977, 38: 145-152.
- [8] Hamilton W. Tectonics of the Indonesian Region [M]. Washington D C: US Geological Survey Professional Paper 1078, 1979: 345.
- [9] Holkway N H. North Palawan Block, Philippines: its relation to the Asian mainland and role in evolution of South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66: 1355-1383.
- [10] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin [C] // Hayes D E, ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of South Eastern Asian Seas and Islands*. II. American Geophysical Union, Geophysical Monograph, Washington D C, 1983, 27: 23-56.
- [11] Hayes D E, Nissen S, Buhl P, et al. Through-going crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 22435-22446.
- [12] Zhou X M, Li W X. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269-287.
- [13] Yang Jing, Feng Xiaojie, Fan Yingfeng, et al. An analysis of middle-late Mesozoic tectonics, paleogeography and petroleum potential in the northeastern South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(2): 89-103. [杨静, 冯晓杰, 范迎风, 等. 南海东北部中晚中生代构造、古地理背景及油气远景分析 [J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(2): 89-103.]
- [14] Xiao Guolin, Zheng Junmao. New opinions about "residual Tethys" in northern South China Sea slope and southern East China Sea [J]. *Geoscience*, 2004, 18(1): 103-108. [肖国林, 郑俊茂. 对南海北部陆坡至东海南部“残留特提斯”的几点认识 [J]. *现代地质*, 2004, 18(1): 103-108.]
- [15] Cai Qianzhong, Liu Shouquan, Mo Jie. Search for new domains of marine-origin petroleum: "Remained Tethys" in the northern South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2000, 14(3): 157-162. [蔡乾忠, 刘守全, 莫杰. 寻找海相油气新领域——从南海北部“残留特提斯”谈起 [J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(3): 157-162.]
- [16] Xia Kanyuan, Huang Ciliu. The discovery of Mesozoic-Tertiary sedimentary basins in the South China Sea and their oil and gas perspective [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 227-238. [夏戡原, 黄慈流. 南海中生代特提斯期沉积盆地的发现与找寻中生代含油气盆地的前景 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 227-238.]
- [17] Zhou Di, Chen Hanzong, Sun Zhen, et al. Three Mesozoic sea basins in eastern and southern South China Sea and their relation to Tethys and Paleo-Pacific domains [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(2): 16-25. [周蒂, 陈汉宗, 孙珍, 等. 南海中生代三期海盆及其与特提斯和古太平洋的关系 [J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(2): 16-25.]
- [18] Sun S, Li J, Chen H, et al. Mesozoic and Cenozoic sedimentary history of South China [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73: 1247-1269.
- [19] Liu Benpei, Zhao Xiven, Quan Qiuqi, et al. Historical Geology [M]. Beijing: Geological Press, 1986. [刘本培, 赵锡文, 全秋琦, 等. *地史学教程* [M]. 北京: 地质出版社, 1986.]
- [20] Chen Jinhua, Xu Kedong, Xu Rouyuan. The Triassic and Jurassic biogeography of South China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1998, 37(1): 97-107. [陈金华, 徐克定, 徐柔远. 中国南方三叠纪和侏罗纪的生物地理区系问题 [J]. *古生物学报*, 1998, 37(1): 97-107.]
- [21] Zamoras L R, Matsuoka A. Malampaya Sound Group: A Jurassic-early Cretaceous accretionary complex in Busuanga Island, North Palawan Block [J]. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 2001, 107: 316-336.
- [22] Xia Kanyuan, Huang Ciliu, Huang Zhiming. Upper Triassic-Cretaceous sediment distribution and hydrocarbon potential in South China Sea and its adjacent areas [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2004, 16(2): 73-83. [夏戡原, 黄慈流, 黄志明. 南海及邻区中生代(晚三叠世—白垩世)地层分布特征及含油性对比 [J]. *中国海上油气*, 2004, 16(2): 73-83.]
- [23] Li Chunfeng. Comparative geological study between the western

- Pacific marginal seas and the paleo-Tethyan marginal seas[C]// Li Jiabiao, Gao Shu, eds. Basin Evolution and Resources of the Chinese Marginal Seas (Vol.3, Serial studies of the formation and evolution of the Chinese marginal seas). Beijing Ocean Press, 2004: 46-53. [李春峰. 西太平洋边缘海与古特提斯边缘海的对比研究[C]// 李家彪, 高抒, 主编. 中国边缘海海盆演化与资源效应, “中国边缘海形成演化系列研究”丛书第三卷. 北京: 海洋出版社, 2004: 46-53.]
- [24] Fontaine H, David P, Pardede R, *et al*. The Jurassic in South-east Asia. United Nations ESCAP[J]. *CCOP Technical Bulletin*, 1983, 16: 1-28.
- [25] Kudrass H R, Hiedicke M, Cepek P, *et al*. Mesozoic and Cenozoic rocks dredged from the South China Sea (Reed Bank area) and Sulu Sea and their significance for plate-tectonic reconstructions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1986, 3: 19-30.
- [26] Hutchison C S. Geological Evolution of South-East Asia[M]. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [27] Teng L S. Geotectonic evolution of the late-Cenozoic arc-continent collision in Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 57-76.
- [28] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 353-431.
- [29] Clift P, Schouten H, Draut A E. A general model of arc-continent collision and subduction polarity reversal from Taiwan and the Irish Caledonides[C]// Larter R D, Leat P T, eds. Intra-Oceanic Subduction Systems: Tectonic and Magmatic Processes. London: Geological Society Special Publications, 2003: 219-81-98.
- [30] Sibuet J C, Hsu S K. Geodynamics of the Taiwan arc-arc collision[J]. *Tectonophysics*, 1997, 274: 221-251.
- [31] Sibuet J C, Hsu S K, Le Pichon X, *et al*. East Asia plate tectonics since 15 Ma: Constraints from the Taiwan region[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344: 103-134.
- [32] Sibuet J C, Hsu S K, Debayle E. Geodynamic context of the Taiwan orogen[C]// Clift P, Wang P, Kuhnt W, eds. Ocean-Continent Interactions with In East Asian Marginal Seas. Washington D C: American Geophysical Union Monograph, 2004: 149: 127-158.
- [33] Madon M H, Meng L K, Anuar A. Sabah Basin[C]// Meng L K, ed. The Petroleum Geology and Resources of Malaysia. Kuala Lumpur: Percetakan Mega Sdn Bhd, 1999: 499-542.
- [34] Haile N S. The recognition of former subduction zones in South-east Asia[C]// Tarling D H, Runcom S K, eds. Implications of Continental Drift to the Earth Sciences. London: Academic Press, 1973, 2: 885-892.
- [35] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[C]// Hall R, Bindell D J, eds. Tectonic Evolution of SE Asia. London: Geological Society of London Special Publication, 1996, 106: 153-184.
- [36] Hutchison C S. The Rajang accretionary prism and Lupar Line problem of Borneo[C]// Hall R, Bindell D J, eds. Tectonic evolution of SE Asia. London: Geological Society London Special Publication, 1996: 106: 247-261.
- [37] Hutchison C S. Marginal basin evolution: The southern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21: 1129-1148.
- [38] Li C F, Zhou Z, Li J, *et al*. Structures of the northeasternmost South China Sea continental margin and ocean basin: Geophysical constraints and tectonic implications[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2007, 28: 59-79.
- [39] Li C F, Zhou Z, Li J, *et al*. Magnetic zoning and seismic structure of the South China Sea ocean basin[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2008, 29: 223-238.
- [40] Li C F, Zhou Z, Hao H, *et al*. Late Mesozoic tectonic structure and evolution along the present-day northeast South China Sea continental margin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31: 546-561.
- [41] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, *et al*. Propagating extension tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 7: 611-616.
- [42] Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, *et al*. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97: 65-77.
- [43] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 6299-6328.
- [44] Flower M F J, Russo R M, Tanaka K, *et al*. Mantle contamination and the Izanagi-Bonin-Mariana (IBM) high-tilem arc: Evidence for mantle extrusion caused by Tethyan closure[J]. *Tectonophysics*, 2001, 333: 9-34.
- [45] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea[C]// Hayes D E, ed. The Tectonic and Geological Evolution of South Eastern Asian Seas and Islands. I. Washington D C: American Geophysical Union, 1980, 23: 89-104.
- [46] Fan W M, Menzies M A. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of ashenosphere mantle beneath eastern China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1992, 16: 171-180.
- [47] Hsu S K, Liu C S, Shyu C T, *et al*. New gravity and magnetic anomaly maps in the Taiwan-Luzon region and their preliminary interpretation[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 1998, 9: 509-532.
- [48] Tsai C H, Hsu S K, Yeh Y C, *et al*. Crustal thinning of the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2004, 25: 63-78.
- [49] Wang T K, Chen M K, Lee C S, *et al*. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2006, 412: 237-245.
- [50] Pautot G, Rangin C, Briais A, *et al*. Spreading direction in the central South China Sea[J]. *Nature*, 1986, 321: 150-154.
- [51] Jin Qinghuan. Geology and Hydrocarbon Resources of the South China Sea[M]. Beijing: Geological Press, 1989: 417. [金庆焕.

- 南海地质与油气资源 [M]. 北京: 地质出版社, 1989: 417]
- [52] Yan P, Deng H, Liu H, *et al*. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27: 647-659.
- [53] Yao Bochu. Characteristics and tectonic significance of the Zhongnan-Lile Fault [J]. *Geological Research of the South China Sea*, 1995, (7): 1-14 [姚伯初. 中南—礼乐断裂的特征及其构造意义 [J]. 南海地质研究, 1995 (7): 1-14.]
- [54] Jin Zhong, Xu Shizhe, Li Zhaorong. Inversion of heterogeneous magnetism for sea mounts in the South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(6): 926-934. [金钟, 徐世浙, 李昭荣. 南海海山非均匀磁性反演 [J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 926-934.]
- [55] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1986, 70: 136-155.
- [56] Yao Bochu, Zeng Weijun, Hayes D E, *et al*. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China and USA [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994. [姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.]
- [57] Barkhausen U, Roesser H A. Seafloor spreading anomalies in the South China Sea revisited [M] // Clift P, Wang P, Kuhnt W, *et al*, eds. *Continental-Ocean Interaction with in East Asian Marginal Seas*. Washington D C: American Geophysical Union, 2004, 149-121-125.
- [58] Hsu S K, Yeh Y C, Doo W P, *et al*. New bathymetry and magnetic lineations identifications in the northernmost South China Sea and their tectonic implications [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2004, 25: 29-44.
- [59] Xia Kanyuan. Geophysical field and crustal structures of the South China Sea [M] // Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, *et al*, eds. *Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea*. Beijing: Science Press, 1997: 1-16 [夏戡原. 南海地球物理场与地壳结构特征 [M] // 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997: 1-16.]
- [60] Wang P, Prell W L, Blum P, *et al*. *Proceedings of Ocean Drilling Program* [R]. Initial Report 184. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2000.
- [61] Li Q, Jian Z, Li B. Oligocene-Miocene planktonic foraminifer biostratigraphy Site 1148, northern South China Sea [C] // Prell W L, Wang P, Blum P, *et al*, eds. *Proceedings Ocean Drilling Program, Scientific Results 184*. Texas, 2004: 1-26 (Online).
- [62] Lallen and S, Jolivet L. Japan Sea—A pull apart basin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1985, 76: 375-389.
- [63] Leblond P H, A maud N, Lacassin R, *et al*. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan Red River shear zone, SE Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 6683-6732.
- [64] Rangin C, Van Trong L, Klein M, *et al*. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam [J]. *Tectonophysics*, 1995, 243: 209-222.
- [65] Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia [J]. *Tectonophysics*, 2002, 347: 189-215.
- [66] Packham G. Cenozoic SE Asia: Reconstructing its aggregation and reorganization [M] // Hall R, ed. *Tectonic Evolution of SE Asia*. London: Special Publications, 1996: 106-123-152.
- [67] Pubellier M, Ali J, Monnier C. Cenozoic plate interaction of the Australia and Philippine Sea Plates: “hit-and-run” tectonics [J]. *Tectonophysics*, 2003, 363: 181-199.
- [68] Wilson J T. Did the Atlantic close and then re-open? [J]. *Nature*, 1966, 211: 676-681.
- [69] Delvaux D, Moeyss R, Stapel G, *et al*. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia: I Paleozoic and Mesozoic pre-rift evolution [J]. *Tectonophysics*, 1995, 252: 61-101.
- [70] Delvaux D, Moeyss R, Stapel G, *et al*. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia: II Cenozoic rifting [J]. *Tectonophysics*, 1997, 282: 1-38.
- [71] Lesne O, Calais E, Deverchère J, *et al*. Dynamics of intracontinental extension in the North Baikal rift from two-dimensional numerical deformation modelling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 21727-21744.
- [72] Tommasi A, Vauchez A. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: An effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185: 199-210.
- [73] Harry D L, Huerta A D, Wilson Cycles: tectonic inheritance and rifting of the USA tectonic and Gulf of Mexico margins [C] // Geological Society of America Abstract Program, 2002.
- [74] Nohda S. Formation of the Japan Sea basin: Reassessment from Ar/Ar ages and Nd/Sr isotopic data of basement basalts of the Japan Sea and adjacent regions [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 599-609.
- [75] Wu H H, Tsai Y R, Lee T Y, *et al*. 3-D shear wave velocity structure of the crust and upper mantle in South China Sea and its surrounding regions by surface wave dispersion analysis [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2004, 25: 5-27.
- [76] Karg D E, Jr, Ingle J C, Bouma A H, *et al*, eds. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project* 31 [M]. Washington D C: US Govt Printing Office, 1975: 677-691.
- [77] Rangin C, Silver E, von Breyann M T, *et al*. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Vol 124* [R]. College Station, 1990.
- [78] Ingle J C, Jr, Suyehiro K, von Breyann M T, *et al*. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Vol 128* [R]. College Station, 1990.
- [79] Tanaka K, Pisciotto K, Allan J, *et al*. *Proceedings of the ODP, Initial Reports Vol 127* [R]. College Station, 1990.
- [80] Larsen H C, Cannat M, Ceuleneer G, *et al*. *Oceanic Crustal Structure and Formation: IODP and ODP Achievements November 2002–December 2005* [R]. Thematic Review, Report Series No. 2, 2009.

[81] Wang P. Cenozoic deformation and the history of sea-land interactions in Asia [M] // Cliff P D, Wang P, Hayes D, *et al.* eds. Continent-Ocean Interactions in the East Asian Marginal Seas

Washington D C: American Geophysical Union, 2004. 149-152.

Opening of the South China Sea and its implications for Southeast Asian tectonics since the late Mesozoic

LI Chunfeng¹, WANG Pinxian¹, Dieter Frank², LI Jiabiao³, Randell Stephenson⁴, XU Shukun⁵, Peter Michael⁶, ZHOU Zuyi¹, JIAN Zhimin¹, LI Qianyu¹, LIU Zhifei¹, GENG Jianhua¹, Gaku Kinura⁷, YAN Pin⁸, QU Xuelin⁸, WANG Liao liang⁹, XIE Xinong¹⁰, WU Shiguo¹¹, WU Nengyou¹²

(1 Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 Federal Institute for Geosciences and Natural Resources Hannover D-30655, Germany; 3 Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Guangzhou 310012, China; 4 University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3FX, Scotland; 5 Taiwan Central University, Taoyuan 32001, Taiwan, China; 6 University of Tulsa, Tulsa 74104, USA; 7 The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan; 8 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 9 Guangzhou Marine Geological Survey, Chinese Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China; 10 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 11 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 12 Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract The opening of the South China Sea (SCS) reveals complex patterns of continental margin break-up and basin formation. Despite extensive studies in the area, accurate dating on basement rocks and overlying sediments in the deep basin is currently lacking. This leaves a large margin of error in estimated opening ages and renders various hypotheses regarding its opening mechanism and history untested. Further, only with an accurate account on the opening of the SCS can we better understand the formations of western Pacific marginal sea basins, as well as the possible roles it played in accommodating the southeast extrusion of the Indochina block due to the collision between the India plate and the Eurasian plate and the uplift of the Tibetan Plateau.

We for the first time propose drilling at four sites in the deep SCS ocean basin. These four drilling sites are located in four different subunits (the northeasternmost SCS, the northwest sub-basin, the east sub-basin, and the southwest sub-basin) of the SCS Basin, and are designed strategically to fulfill the overall research objective, which is to unravel the opening history of the SCS and its implications for Southeast Asian tectonics since the late Mesozoic. The site in the northeasternmost SCS basin will help determine crustal affinity of that part of crust and verify the existence of the proto-SCS. The site in the northwest sub-basin will give us the likely earliest opening age of the SCS. The two sites in the east and southwest sub-basins will focus on determining the absolute ages, basement mineralization and magnetization, and the relative opening sequences of these two sub-basins. The water depths at these sites range from about 2 910 m to about 4 400 m, and the drilling depths are estimated to be from about 700 mbsf to about 2 200 mbsf. The total penetration depth is 5 959 m, of which 5 359 m is through sediment and 600 m or 400 m into basement. Each site is located using existing geophysical site survey data, and an effort is being made to acquire additional site survey data.

Key words South China Sea, Continental break-up, Basin formation, Seafloor spreading, Crustal evolution and mantle flow.